

堆肥发酵方法

目录

1. 堆肥化过程中的微生物学

- 1.1 堆肥化和堆肥产品的定义 P2
- 1.2 底物 P3
- 1.3 堆肥各过程分段介绍 P4
- 1.4 堆肥过程中涉及的微生物 P7
- 1.5 碳氮平衡 P8
- 1.6 腐熟程度的分析 P9

2. 堆肥过程的影响因素

- 2.1 堆肥原料 P12
- 2.2 影响堆肥的环境因素 P14
- 2.3 堆肥化过程进程 P18
- 2.4 指示物 P19
- 2.5 堆肥稳定程度的确定 P20

3. 合格的堆肥 P22

4. 名词表 P25





1.1 堆肥化和堆肥产品的定义

含有有机质底物是堆肥的一个显著特点。更精确地说，**堆肥**(1)是指在有氧条件下，各种底物混合大量微生物群落以固态进行生物降解的过程。而纯的底物的生物转化称为**发酵**(2)或者生物氧化，而不是堆肥。

注：羊粪不是纯底物，其中掺杂了秸秆纤维和其它少量有机物质，所以羊粪的无害化处理属于堆肥，而不是发酵，只是大众对堆肥与发酵的不了解，导致很多商家将“羊粪堆肥”宣传成“羊粪发酵”，以获得更好的认同感。这里强调堆肥与发酵的区别是因为，堆肥必须是有氧气参与，而发酵可以有氧也可以厌氧；堆肥一般经过高温腐熟，而发酵不一定经过高温。堆肥过程包含了有氧反应、厌氧反应和发酵反应，反之不成立。

堆肥过程产生的能量主要表现为**热**，这就导致堆体温度的上升。因为在整个堆肥过程中，会经历一个高温阶段，而在高温阶段的前后，则分别是两个中温阶段。在堆肥过程中，堆体会暂时的释放植物毒素（中间代谢物、氨等）。在这个（堆肥）过程的最后，植物毒素基本上都消失了，并且最终产物（堆肥）对植物的生长是有利的。堆肥过程最终产生了二氧化碳、水、无机物和稳定有机质（堆肥产物）。这个过程从易降解的有机质的氧化开始，第一阶段称为分解阶段，包括了前期的中温和高温阶段。第二个阶段为稳定化阶段，堆体温度逐渐降低稳定，这个阶段主要是分解比较缓慢的分子的无机化，还有一些更复杂的过程，例如木质纤维素的**腐殖化**(3)。

从科学的角度来看，堆肥化在有机质存在量相当大的阶段时停止，（超过初始值的50%）；否则这个过程就会继续，如果环境条件允许的话，它将进行至所有有机质成分都无机化。（本段存疑，待验证，谨慎参考！）

堆肥化过程的主要产物称为堆肥，也可以定义为堆肥化过程产生的稳定、无害，并且对植物生长有利的肥料。

堆肥经历了：

1. 初始的快速分解阶段
2. 稳定化阶段
3. 不完全的腐殖化阶段

对新鲜有机质进行堆肥化转化主要有以下几个原因：

- 消灭不稳定的新鲜有机质中的植物毒素
- 将对人类、动物和植物健康不利的个体（致病病毒、细菌、真菌和寄生生物、虫卵等）减少到不能构成危害的水平
- 产生有机肥料和土壤改善剂
- 完成有机废物、有机垃圾和其它生物质的再利用

很多形容词都会被用来形容堆肥，有些是正确的，例如：有氧、固态、卫生、优质肥料。



而有些则是与堆肥的定义矛盾的错误的，例如厌氧、新鲜、液态、异味等，这些词应该避免出现。

1.2 底物

堆肥化过程中所用到的各种原料就叫做底物，通常这些底物都是生命必需的，并来源于生物活动（例如光合作用(4)或生物质消耗）。这表明，实质上，所有可用底物基本都来源于植物、动物或者微生物(5)。一般来说，植物原料占有最大的比重，而动物组织或者微生物组织只占混合物的小部分，但通常也是最有影响的部分。表：降解底物中主要的天然化合物 中列举了堆肥底物中的主要天然化合物。

1.2.2 木质素

木质素(6)是植物的主要组成部分，也是降解最缓慢的底物。木材中木质素的含量为18%~30%。木质素的单体单元数量并不是很大，但是由于它的基础单体化合物之间的各种键的存在（对苯基丙烷衍生物，主要是松柏醇），它的降解非常复杂。通常，木质素的降解是共同代谢类型，因此其能量输出基本上可以忽略。

木质素的降解最初是通过真菌，真菌在活的植物体中是很常见的病菌。降解木质素的真菌也被成为白腐菌，例如绒革盖菌（云芝蘑）、毛韧革菌（假云芝蘑）。它们降解木质素并且留下浅色的纤维素部分。一些真菌，例如糙皮侧耳，可以同时降解纤维素和木质素。

1.2.2 纤维素

参见名词表：纤维素(7)

纤维素是植物组成中含量最多的。几乎各种类型的有机垃圾中都可以发现纤维素，有机垃圾中出现如此多的纤维素是因为植物在垃圾中占据了很大的比例（例如木材工厂、农业废物和家庭垃圾等）。

此处省略关于纤维素专业说明（主要写了你也看不懂，因为我也看不懂）

在有氧条件下，许多真菌、细菌和其它黏液菌都会参与降解纤维素的反应。微生物群的催化作用（大结构成分的破坏）有很重要的意义。通常，真菌比细菌对纤维素的降解更重要，特别是当纤维素镶嵌在木质素中时（例如树木和稻草）。纤维素富含碳元素，但是不含有氮元素或其它重要元素，因此，真菌的菌丝结构有着竞争优势。需要提到的真菌有毛壳菌属、镰刀霉、和曲霉。在细菌中，最主要的是黏液菌以及相关菌属（嗜热纤维菌属、多囊菌属、堆囊菌属）。同时，假单胞菌属和其相关菌属也可以降解纤维素。但是只有一部分放线菌属（以前称为放线菌类）可以降解纤维素。

在厌氧条件下，纤维素主要由嗜温性细菌和嗜热梭菌降解。



1.2.3 半纤维素

木聚糖：在纤维素中，木聚糖是最重要的一种，稻草、甘蔗渣（高达30%）和木头（2%~25%）中都含有木聚糖。木聚糖由（木糖和树胶醛糖）或者己糖（葡萄糖、甘聚糖和半乳糖）组成，聚合度大约在30~100，主要的降解酶是木聚糖酶，许多细菌和真菌可以产生（某些情况下可以人工合成）。

果胶：果胶是由多聚半乳糖醛酸组成的直链分子，可以被果胶酶降解，而果胶酶在真菌和细菌中非常常见。许多植物病原体都可以产生果胶酶。

淀粉：淀粉由直链淀粉（20%）和支链淀粉组成。直链淀粉是由D-葡萄糖基构成的多糖链；而支链淀粉在1, 6位存在支化并且含有磷酸残基和钙、镁原子，两种淀粉降解酶都很重要。

- 磷酸化酶作用
- 水解酶作用

1.2.4 胞壁质

胞壁质包括直链的N-乙酰氨基葡萄糖和N-乙酰胞壁酸。胞壁酸包括乳酸基团和各种氨基酸。胞壁质是大部分细菌细胞壁的主要成分。

1.2.5 角质素

从整体上看，角质素不如纤维素重要。而化学组成上，纤维素和角质素十分相像。纤维素的单体单元是葡萄糖，而角质素的单体是N-乙酰氨基葡萄糖。对于降解者来说，**两者的主要区别是角质素中含有高浓度的氮元素（大约7%的氮元素，角质素中的碳氮比约为5）**。

许多**真菌**（例如曲霉）和**细菌**（例如黄杆菌、噬纤维菌、假单胞菌）都可以利用角质素作为碳源和氮源。角质素由外酶降解为N-乙酰氨基葡萄糖，可以被吸收转化为果糖-6-p，从而归为碳水化合物。

角质素是真菌细胞壁最重要的结构化合物，并且是组成昆虫和甲壳类动物的外骨骼的基础物质。在贝类加工厂中，角质素是主要的垃圾产物。

1.3 堆肥各过程分段介绍

自然条件下有机混合物的降解通常发生在土壤和沉积物中、土壤表面或者水体中。在大多数情况下，降解中的底物与已降解的原料或外部**基质**会有接触。因此，降解原料和基质之间的营养转换（例如，土壤、沉积物和水）是可能存在的，并且降解原料的分散性使得其需要一定的环境温度才可发生降解。但也有例外，例如，秋天堆积的树叶在降解过程中放出的热足以使原料温度上升。**在大多数情况下，我们将各种物质收集在一起，保证其可以自行产热，这就是堆肥化过程的典型特征。**化学及生化反应依赖于温度，因此许多化学、物理和生物特性在堆肥化过程中都会发生改变。



参见下图：堆肥过程中的微生物群落：温度反馈

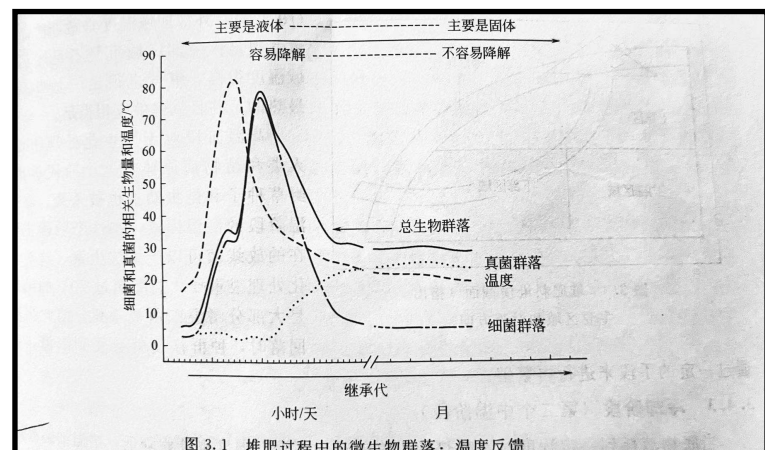


图 3.1 堆肥过程中的微生物群落：温度反馈

堆肥中包含高活性高密度 (10^{12} 细胞/克) 的微生物群落。不断变化的条件 (温度、PH、空气、水分、可利用底物) 使得各种生物生长出现指数生长阶段和稳定期阶段。尽管微生物的生存能力很强，但问题是只有很小部分的微生物可以进行培养。因此不论何时，微生物群落在很短的时间内就会被其他物质取代。

从微生物学角度看，自然界中的降解过程可以看作是一系列连续培养，每一个都有各自的物理 (例如温度)、化学 (可利用底物)、生物 (例如，微生物群体组织成) 特性和反馈效应。这些变化使得对整个过程进行研究变得很困难，因为实验无法模拟温度、空气、湿度等与表面体积相关的变量。但是，现在被广泛接受的理论是堆肥化可以分为四个阶段，下面我们分别对四个阶段进行介绍。

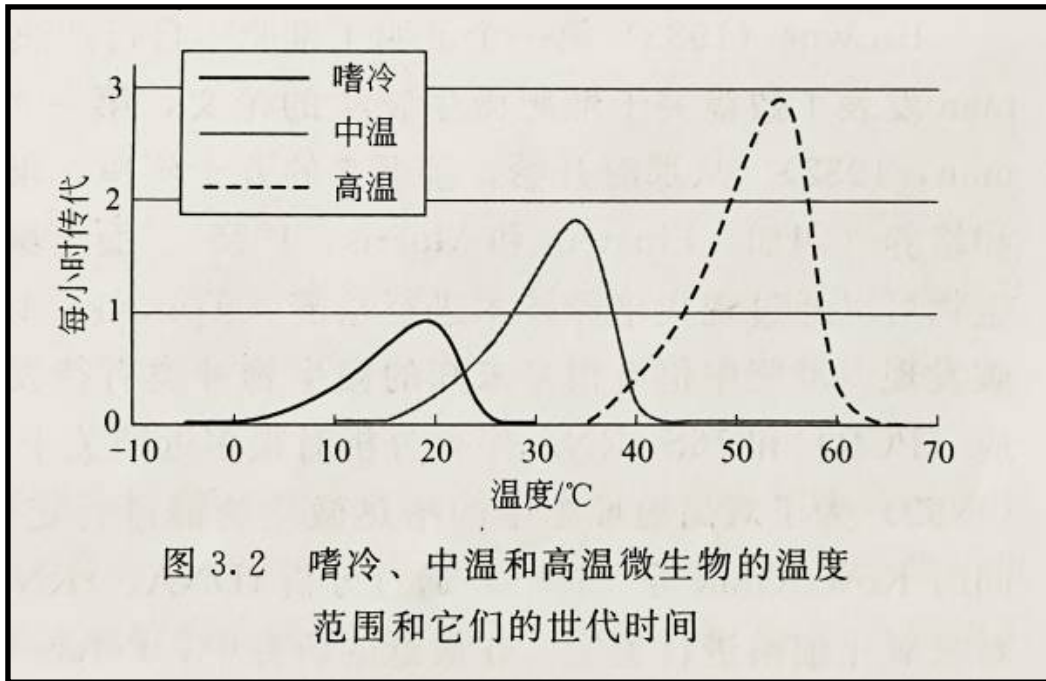
1.3.1 中温阶段 ($25 \sim 40^{\circ}\text{C}$)

在第一阶段 (也被称作起始阶段)，易降解且富含能量的物质充足，例如糖和蛋白质，逐渐被真菌、放线菌和细菌等降解，通常称这些微生物为初级分解者。提供机械作用 (例如旋转) 的有蠕虫、螨虫、节肢动物等，其他类群等作为催化剂的作用非常小。根据堆肥模型，上述动物的作用基本上可以忽略，但是在蚯蚓堆肥中却很重要。经验证，在初始底物中嗜温微生物的数量比嗜热微生物的数量多三个数量级，但初级分解者的活动 (微生物的代谢) 却会导致温度升高。

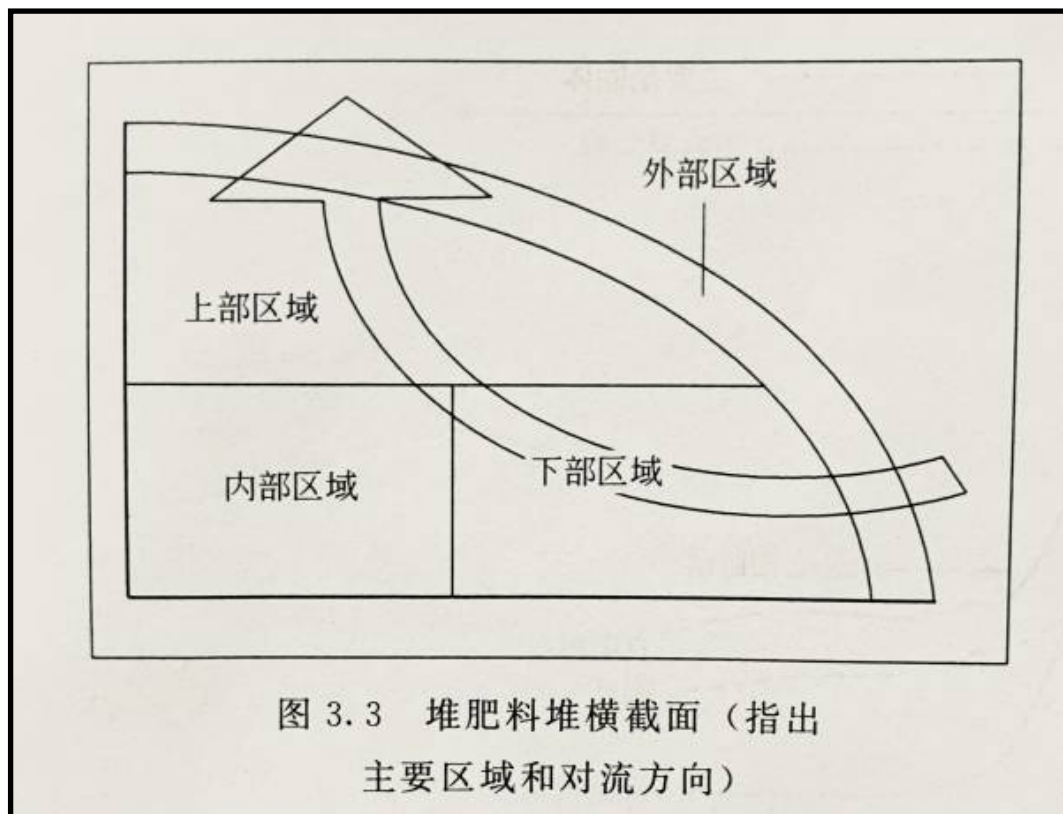
1.3.2 高温阶段 ($35 \sim 60^{\circ}\text{C}$)

耐高温的有机体在这个阶段有较大的竞争优势，并逐渐在最后取代了几乎所有的中温微生物群。上一阶段中的嗜温微生物逐渐死去，并最终被嗜热微生物所利用。此时，分解作用的速度很快，并不断加速，直到温度大约达到 60°C 。当堆体温度达到 $35 \sim 55^{\circ}\text{C}$ 之间，嗜热真菌的数量达到最大值，温度的继续升高则会抑制真菌的生长。不过，在较高的温度下，耐热和嗜热的细菌和放线菌依然很活跃。

如果不是大部分微生物在超过 65°C 下都遭到破坏，温度很可能会持续上升，甚至超过 80°C 。也有可能并不是因为微生物作用导致温度上升，而是非生物放热反应的影响，其中可能包括放线菌分泌物的耐高温酶的作用。参考下图。



在一个堆肥料堆中，并不是所有区域都会达到同一个温度，所以，需要经常翻堆，使得所有基质都可以轮换转移到最热的核心地带。从微生物学角度来看，可以将料堆分为四个温度区域（如下图）。外部区域温度是最低的，并且氧气充足；内部区域氧气不足；下部区域温度很高，氧气也很充足；上部区域是最热的，并且氧气供应相当充足。





高温阶段对于无害化处理很重要。人类和植物病原体在这个阶段被消灭，野草种子和昆虫幼虫以及虫卵等也被杀死。除了高温阶段的高温因素，在这个阶段主要存在的放线菌可以产生抗生素，这对无害化处理很重要。温度超过70°C的结果就是大部分嗜热细菌被杀死，因此当温度回落时，菌群恢复就会受到阻滞。可以通过一定的手段来进行菌群的再繁殖。

1.3.3 冷却阶段

当底物消耗到一定程度时，嗜热微生物的活力下降，温度也开始降低。嗜温细菌重新繁殖，它们来自受保护的微小生境中存活的孢子，或者从外部进行接种。如果初始阶段的微生物可以降解糖类、低聚糖和蛋白质，那么第二个中温阶段的特征是微生物开始降解淀粉和纤维素，它们几乎都是细菌和真菌。

1.3.4 腐熟阶段

在腐熟阶段，基质质量下降（碳氮比在20~30的堆料堆肥后，一般会较少30%左右），经过一系列的过程后，微生物群体的组成几乎全部变化，通常是真菌数量增加，细菌数量减少，混合物不再进一步降解，形成了木质—腐殖质复合体等，并成为主要物质。（这一段对腐熟肥料的特征描述比较模糊，有时在具体解释，不过可以肯定的是，堆肥产物主要是腐殖质，而腐殖质的颜色是棕色，所以腐熟好的堆肥一般是棕色，也就是土壤的颜色，因为土壤中富含腐殖质。）

1.4 堆肥过程中涉及的微生物

1.4.1 细菌

无菌丝细菌在堆肥过程中的重要性长久以来都被忽略了，这可能是因为真菌和放线菌有更好的可见性。在一些堆肥化过程中，例如污泥堆肥，在开始阶段，细菌比真菌更加重要。如果温度保持在60°C以下，超过40%的固体在最开始的7天内被降解，这几乎全部是通过细菌活动完成的。温度在50~65°C之间时，细菌有更好的选择优势，特别是芽孢杆菌。当温度超过65°C时，嗜热脂肪芽孢杆菌占主导地位，几乎像是在单一培养。

专性厌氧细菌在堆肥中可能会很常见，但至今，很少有信息能证明这一点。

1.4.1.1 放线菌

关于放线菌的解释，可参见名词表：（8）放线菌

放线菌适合在中性或者微碱性pH条件下生存，并且可以降解较复杂的底物。很多放线菌都耐热甚至嗜热，可以在50~60°C的温度范围内生存。许多放线菌在底物湿润且氧气充足的条件下生长旺盛，当最容易降解的底物已经被细菌降解且温度超过了45°C，就会达到这些条件。放线菌同时也是之后的微生物菌群的代表。



担子菌纲的堆肥培养底物是一个特殊情况。在这个特殊情况中，放线菌的生长在第二个阶段尤其旺盛，通过肉眼可以看到厚厚的一层放线菌，这个阶段称之为“受热变质”阶段（温度在45° c左右，湿度较低）。在蘑菇培养中，这种放线菌阶段是成功的决定因素。通过调节温度和空气供应量使得整个底物都能维持在48° c。这样做的主要原因是微生物对铵盐的重新同化。堆肥的过度升温（>70° c）会导致底物不可逆转的变化以及释放出氨。（所以当翻动堆料时升腾出大量氨气说明堆体温度过高，同时氨的流失会导致氮的流失）

1.4.1.2 栖热菌属/异常球菌属

栖热菌属/异常球菌属在有机底物中的生长温度是40~80° C，最适合的温度是65~75° C。生物垃圾堆肥中，一克干物质中的数量高达10（7）~10（10）。因此，之前只能在地热区域发现的栖热菌属可以很好的适应高温堆肥系统，并且在温度峰值阶段起重要作用，同时，也从堆肥中分离出了一些自养细菌。这些无芽孢细菌在60~80° C生长，最适宜为65~75° C，并且和起初只在地热区域发现的氢杆菌菌株十分相像。它们氧化硫或者氢获得能量，并利用二氧化碳合成有机质。

1.4.2 古细菌

许多古细菌都是嗜热甚至嗜超高温的。它们最初从温热火山口区域分离出来的，只有在少数情况下，可以在堆肥中分离出古细菌，但是考虑到最近报道的堆肥中有甲烷的生成，很有可能从堆肥中找到产甲烷的古细菌。古细菌的数量很少的原因可能是它们通常是贫养的，而且它们的世代时间比细菌高很多，这就造成它们不适应快速变化的外界条件，

1.4.3 真菌

在初始阶段，真菌和细菌争夺容易降解的底物。由于细菌的最大生长速率比真菌高出一个数量级，真菌很快就被淘汰。同时，氧气的供应对真菌来说比细菌重要的多，甚至在强制通气的系统，也会出现短暂的缺氧情况。

除了上述原因，还因为真菌不耐高温，所以在高温阶段几乎可以忽略。当底物中的木质素和纤维素非常充足的时候则是一个特殊情况，在这个时候，整个堆肥过程真菌都是最重要的。在堆肥的最后阶段，含水量下降，对真菌更加有利。

1.5 碳氮平衡

堆肥过程中的有机质经历了如下不同的代谢过程：无机化作用、腐殖化作用和部分降解作用（通过有氧呼吸、无氧呼吸和发酵实现）。

在一个处理良好的降解过程中，大约50%的生物有机质降解转化为CO₂、H₂O、无机盐和能量。在剩余的有机质中，20%的有机质经历了复杂的代谢转换后转化为类似腐殖质的物质；另外30%经过有氧呼吸和无氧呼吸作用后最终转化为不太复杂的有机分子。堆肥过程中生物有机质的损失大概为30%~60%。影响这



个数值的因素包括：堆肥系统、堆肥过程的时间、供氧系统、有机质的性质（物理和化学）、粒子尺寸、碳氮比例和温度、湿度。

即使意义会有不同，但是所有发生在自然界中的氮的微生物转化都会在堆肥化过程中发生。在堆肥化过程中，最重要的作用是**无机化作用**、**硝化作用**、和**同化作用**。在微生物细胞中发生的**硝酸盐**的还原同化和有机氮化合物的合成是堆肥中的重要步骤，从而减少堆肥和土壤中的氮损失。

作为厌氧活动，**固氮作用**和**脱氮作用**都可以在堆肥中发生，但反应速率都很慢。**在堆肥中，氮含量的下降基本都是以氨气的形式挥发造成的。**但是，堆肥过程中碳氮比下降的主要因素则是过程中碳元素的大量损失（主要以CO₂形式）。初始原料的总含氮量也会影响其挥发速度。

如果不及时利用**硝化细菌**氧化这些含氮有机物产生的**自由氨**，氮元素就会挥发到环境中而造成氮损失。此外，堆肥中的厌氧微生物也会通过反硝化作用把硝酸盐转化为氨气而造成氮损失。这个过程只能发生在无氧环境中，但在供氧良好的堆肥化过程中也会存在。一些**脱氮细菌**在65°C的高温条件下仍能存活，其他的一般存活在中温范围（假单胞菌属、副球菌属）。堆肥中**厌氧氨氧化**的重要性现在还未知，但是在评价堆肥中潜存温室气体问题时就变得很重要了。

虽然会有**氮**元素的损失，但在堆肥后期，固氮细菌的活动会回收部分氮元素。目前已经在堆肥中分离了很多菌属，主要都存在于中温阶段，如固氮螺菌属、克雷伯菌属、肠杆菌属、芽孢杆菌和梭状芽孢杆菌。氨水和高温的存在则会抑制固氮作用。因此，**固氮酶**的活性在分解后期更高一些。

在堆肥第一阶段（25~40度），高温、PH值、氨水严重的抑制了**自养硝化作用**。大部分氨基氧化细菌（**硝化杆菌**）受到抑制。由细菌（节杆菌属、放线菌属）和真菌（黄霉菌、绿霉菌）进行的**异养硝化作用**似乎很少受到上述因素的限制。事实上，**堆肥的最初阶段里，硝酸盐分解产物几乎都是由异养硝化微生物作用产生的。**这些异养硝化微生物和那些直接同化氨作为自身组成的微生物是减少氨挥发的负面影响的主要因素。该作用的重要性是双重的：减少氨对空气的污染、减少堆肥中氮元素的损失。

1.6 腐熟程度的分析

用视觉分析或者任意单一参数法分析来判定堆肥样品的稳定性和腐熟性是很困难的。不在进行高速分解并且营养物质彻底分解的堆肥产物是稳定的；相反，不稳定的堆肥产物，会因为进一步分解而继续向土壤中释放营养元素，或者固定化土壤中的氮元素。在某些情况下，不稳定的堆肥产物也是有用的，例如需要直接和快速提供氮元素的情况。**腐熟度指的是堆肥产物中植物毒性的程度。**未腐熟的堆肥产物会比腐熟的堆肥产物含有更多的抑制生长的化合物。

传统的堆肥分析集中于用N、P、K和微量营养元素的含量来反应肥力程度。事实上，堆肥比肥料更复杂，并且它对植物最显著的价值远远超越其对土壤的无机物贡献。堆肥的微生物组成也是其作为土壤接种剂和植物病害抑制剂的原因。

事实上，堆肥的品质和腐熟度的控制与20年前相比并没有什么区别：例如经常使用的一些化学参数PH、氨、碳氮比等，以及植物生长与传代测试。现在，简明的堆肥产物腐熟度和品质标准仍然缺



乏，并且很少包含微生物方面，尽管微生物活动是堆肥产物的生产和利用的主要步骤。比起单一的化学参数或者发芽试验中植物的响应值，微生物测试可以提供更多的关于堆肥产品特征的信息。评估堆肥产品腐熟度和品质的微生物测量方法将在接下来的部分进行讨论。

1.6.1 正确分析堆肥腐熟度的首要条件

因为堆肥是一个生物过程，所以在抽样后，降解还会继续进行。因此，样品的保藏对生物分析是十分必要的。必需注意存储条件不能改变微生物测试结果。对此，我们有两种选择：首先，样品必需放置在有氧气交换的隔离环境中。这个存储方法适用于样品在24小时内分析使用的情况。这种保藏环境保证了样品可以保持堆肥的温度，并且嗜热微生物不会被嗜温微生物取代。如果存储时间需要超过24小时，那么推荐冷却到2°C，同时也要采取一些预防措施。事实上，一些未成熟的生物固体堆肥样品可以冷藏存储11个星期而不被影响，超过两个星期的样品受到的影响与低于两个星期的样品相近。任何微生物法都要求活细胞的存在，因此保藏后的活化很重要，此外，在室温下用分子生物学方法干燥也是可行的。

1.6.2 微生物的分离

堆肥中微生物含量的标准分析是由以下六个微生物功能组确定的：好氧细菌、厌氧细菌、真菌、放线菌、假单胞菌和固氮菌。目前，已有方法对堆肥产物中微生物的浓度进行测量。但是，为了得到腐熟度的可靠标准，仍然需要通过更多的研究来取得重要的基准数据。

1.6.3 放热

测量堆肥的温度可以简单而快速地确定堆肥腐熟度。通常来说，在适合的气候条件下，如果堆肥的温度比环境温度高8°C以上，则说明堆肥产物还远远没有达到稳定。

由Niese（1963）年提出的在杜瓦瓶中的自热测试是目前常用的一个测试。这个测试的原理是（微生物降解有机材料的自热效应。如果温度缓慢上升或者不上升则说明了堆肥已经高度腐熟。在这个测试中，将堆肥产物放入一个2升的杜瓦瓶中，并在上三分之一处放置一个温度计或者温度传感器，记录十天内的最高温度，并将结果转换为分解等级（也被称作腐烂级或者降解程度，见下图）。杜瓦瓶自热测试是一个非常完善的测试，并且在对比研究中，它也是堆肥腐熟度最敏感的指标。该测试记录了为期57天的生物固体堆肥的变化。

表 3.4 降解程度的自热测试		
温度的上升/°C	降解程度	描述
>40	I	保持原样、少部分降解
30~40	II	少部分降解
20~30	III	中等降解
10~20	IV	很好地降解
0~10	V	更进一步降解或降解完成



1.6.4 呼吸作用

堆肥过程中，可生物降解的材料被降解。有氧条件下的微生物降解称为**呼吸作用**（有机质被转化为水、CO₂、无机化合物和腐殖质）。呼吸作用与降解材料的内部供给直接相关。可以通过测定O₂的消耗量或CO₂的生产量测定呼吸作用。

氧气的利用速度代表了生物活动的程度。在园艺应用中，认为每千克堆肥干物质每小时的O₂利用量小于20mg是稳定的。在田地应用中，认为每千克堆肥干物质每小时的O₂利用量小于100mg是足够成熟的。Solvita测试是快速测量呼吸速度的方法，并且可以测量氨含量。每天每克堆肥碳释放小于5mgCO₂被认为是稳定的，并且很适合播种，超过20mgCO₂表明堆肥产物并不稳定。**对结果必需进行认真分析，因为那些冷的、干燥的甚至盐分高的堆肥产物即使没有达到稳定也可能没有呼吸作用。**

基于呼吸作用的堆肥腐熟度测试见下图：

表 3.5 基于呼吸作用的堆肥腐熟度测试			
方法	原 理	过 程	参 考
密闭罐方法	产生 CO ₂ ，1~4 天潜伏期，不连续	将堆肥放在气密罐中，用碱性溶液吸收 CO ₂ ，然后滴定，简单、经济	Isermeyer(1952)
红外气体分析	产生 CO ₂ ，连续	通过测量流量设备，精密度高	Heinemeyer 等(1989)
电解呼吸仪	连续消耗 O ₂		Usui 等(1985)
Slovita 测试	通过比色法对堆肥呼吸作用产生的气体进行凝胶测量，除 CO ₂ 外，还包括氨的测量		Seekins(1996)

1.6.5 群落水平的生物学剖面法（CLPP）

该方法被推荐来测试堆肥腐熟度，其原理是将堆肥提取物接种在含有31种不同碳源的微滴定盘中，对这些碳源的利用方式则表明了堆肥的腐熟与否。

1.6.6 酶活测试

许多酶，包括还原酶、纤维素内切酶、糖苷酶、脂肪酶、磷酸酶、脱氢酶和精氨酸氨化法，都已经被用来进行腐熟度测试，但这些方法都没有在实际应用中获得成功。

1.6.7 其它堆肥腐熟度测试方法

（待补充）



2. 堆肥过程的影响因素

2.1 堆肥原料（底物）

在堆肥过程中，底物指的就是用来堆肥的有机废弃物。和其他生物过程相类似，底物的物理和化学性质是堆肥过程可行性的决定因素（就过程和速度而言）。本质上是微生物可用的营养元素及其浓度和营养元素的平衡决定了堆肥过程的可行性。底物的大部分物理性质主要和粒子尺寸及材料水分含量有关。和化学性质有关的因素包括分子尺寸、复杂性、本质和元素组成。

因为底物的分子结构的复杂性和本质决定了各种微生物对营养元素的可同化性，所以这些性质是特别重要的。微生物同化一种底物的能力取决于微生物合成可以作用于复杂化合物的酶的能力。复杂化合物在酶的作用下成为中间化合物或者是可以被该生物的新陈代谢和新的细胞物质的合成所利用的分子。如果所有微生物都没有同化所必需的酶，那么堆肥底物会保持最原始的状态。

因此，关于营养元素的讨论可以从这个角度来考虑，废弃物应该含有所有必需的营养元素，只有很少的化学营养物必须或者应该加入到堆肥中。

2.1.1 营养元素的种类和来源

微生物的主要营养元素是碳（C）、氮（N）、磷（P）和钾（K），微量营养元素包括钴（Co）、锰（Mn）、镁（Mg）、铜（Cu）以及一些其他的元素。所需钙（Ca）的含量处于主要元素和微量元素之间。事实上，钙的主要作用是缓冲剂，即调节pH值。（比如有些生产者在堆肥过程中为了中和堆料的酸碱会混合适量的石灰）

即使所需的营养元素在堆肥底物中大量存在，但除非是以微生物可以同化的形式存在，它们也不可以被微生物利用（这种情况和人类营养元素中的纤维素一样，虽然人会在偶然情况下摄入纤维素类物质，例如纸，但纤维素中的碳元素对人类没有什么营养价值）。

需要特别记住的是底物对于微生物是否可用取决于微生物是否能合成酶。微生物分泌的一系列酶所组成的酶的混合物，可以对新产生的废物进行破坏、降解和利用；反之，只能利用降解产物（中间物）作为营养元素源。这个现象的意义在于废物的降解和堆肥化是一组各不相同的微生物连续共同作用的结果，也可以说是在为下一组微生物做准备。

堆肥中营养元素可用性的另一个重要方面是一些有机分子非常坚固，即抵抗微生物作用，甚至抵抗拥有特定酶的微生物。结果就是这类材料的降解速率非常慢，甚至是保持在所需的最佳环境条件下。如之前的章节所讨论的，这种材料通常的例子是木质素（木头）和角质素（羽毛、贝类和外骨骼）。大多数微生物不能利用纤维素中的碳，虽然这对一些真菌来说很容易。蛋白质、多肽和氨基酸中的氮元素很容易被利用，木质素和角质素中较少的氮元素反而很难被利用。淀粉和糖类很容易被降解，脂肪则困难一些。



2.1.2 碳氮比

总营养元素的平衡最重要的一点就是有机碳总量和有机氮总量之比（C/N）。大多数类型堆肥的最佳起始C/N 是 25~30。

有生命的微生物在它们的生命活动中每利用1份氮就会利用30份碳。其中20份碳氧化成CO₂。(ATP)，其余10份用于合成原生质。事实上，很多细菌中的C/N 都是9~10。

如果碳的含量高出氮的含量过多（高的 C/N），生物活动将会减少。在堆肥运行中，这种现象需要很长时间降低 C/N 到合适的值（Golueke, 1977）。在某种程度上，最适宜的C/N决定堆肥的质量，特别是碳成分。如果化合物中的碳很难被微生物的攻击破坏，那么碳的利用会很缓慢。这种类型的化合物主要是木质素、芳香烃和纤维茶的一些物质形态。

如果 C/N低于 20，唯一可见的不利结果是氨挥发导致的氮损失。这种情况会被高温和 pH（大约8~9）进一步增强。这种损失会发生在堆肥起始的高温阶段，特别是料堆在翻转或者反应器在翻转时。通常情况下，静置料堆的外层材料会抑制氨从料堆中挥发。氮损失造成的后果除了产生臭味和污染环境、降低了终产物的氮含量外，也限制了有机肥料的质量。

在一个控制得较好的堆肥过程中，C/N 是不断降低的。这是因为微生物对含碳化合物的无机化作用，使碳以 CO₂ 的形式损失。

如果堆肥产物 C/N 过高且降解速度快，就会占用植物生长所需的氮元素。如果堆肥产物C/N过低，氨的释放对植物的根部有毒性作用 [Zucconi 等， 1981 (a)， (b)]。

堆肥中微生物活动所需的营养元素中，堆肥废物的 C/N 是最值得注意的因素。经验告诉我们，几乎毫无例外的，如果适当控制数量和比率，典型的有机废物中存在所有的营养元素。

同时 C/N 也是表达微生物通过新陈代谢获得能量和合成新的细胞材料的过程中使用这两种元素的数量函数。一大部分碳元素都被微生物在新陈代谢活动中氧化成 CO₂，剩余的碳则被转化为细胞壁或细胞膜、原生质和储能物质。氮元素则主要消耗在合成原生质。而所需要的碳元素比需要的氮元素要多得多。C/N 偏离25/1~30/1 太多就会导致降解和堆肥过程缓慢。另一方面，如果 C/N 低于这些数值，会促进氮元素作为氨挥发。这是因为氮元素多于微生物转化成有机质所需要的量，就转化成氨。高的pH 值和高温的共同作用很有可能导致氨的挥发。

如果垃圾中的 C/N 过高，可以相应地加入含氮垃圾。相反的，如果 C/N过低，可以通过加入含碳垃圾来降低。表4.1中列出了各种垃圾和残渣的氮含量和 C/N。其余的信息将在其他章节给出。

垃圾中氮元素的含量可以通过标准凯氏法测出。碳元素的含量很难得出，这是因为很难得到有代表性的样品，所需的分析仪器也很昂贵，并且需要有技能优秀的分析师。幸好我们有方法可以评估堆肥中的碳含量，这是基于新西兰研究者（Anonymous,1951）在19世纪50年代研究所得的公式，其形式如下：



表 4.1 各种废弃物的氮含量和 C/N (Golueke, 1977)

材料	氮含量	C/N	材料	氮含量	C/N
活性污泥	5	6	猪粪	3.8	—
骨肉粉	—	4.1	马铃薯顶部	1.5	2.5
血	10~14	3.0	家禽粪便	6.3	15
牛粪	1.7	18	原污水污泥	4~7	11
处理过的污泥	2~4	—	锯末	0.1	200~500
剪下的草	3~6	12~15	羊粪	3.8	—
马粪	2.3	25	稻草、燕麦	1.1	48
杂草	214	19	稻草、小麦	0.3~0.5	128~150
粪便	5.5~6.5	6~10	小梗	15~18	0.8
非豆科蔬菜垃圾	2.5~4	11~12			

含碳百分比 = (100 - 灰分) / 1.8

研究表明通过这个公式所得的结果和更精确的实验室研究结果相差 2%~10%。在小规模的堆肥中，进行氮元素和碳元素的分析在经济方面是不合理的，通常可以假设如果绿色（颜色）新鲜垃圾（或者食物垃圾、新鲜垃圾）和干燥的非绿色垃圾的体积比是1: 4时，C/N就会接近最适比值。

2.2 影响堆肥的环境因素

因为堆肥化是一个生物过程，所以基本上要受决定微生物系统的各种环境因素的影响。堆肥中影响堆肥的环境因素包括温度、pH、通气量、水分含量以及底物（即含有基本营养元素）。因为在之前的章节已经讨论过底物，这里我们将不再继续讨论。这些影响因素共同决定了降解的速度和程度。显然的，这几种因素的总体越接近于最佳条件，堆肥化的速度就会越快。除了“共同”这一概念，对于一个特定的过程，与其达到最大潜在速率关系最紧密的决定性因素是最容易偏离最佳条件的因素。起到最大限制作用的因素被称为“限制因素”。

2.2.1 温度

堆肥化是微生物氧化降解混合有机物质的过程。这个放热过程产生了相当大的能量，只有40%~50%的能量可以被微生物用来合成ATP，剩余的能量都以热的形式损失。大量的热造成了堆肥体中温度的上升，甚至可能达到 70~90° C，Finstein 称这种现象为“微生物自杀”（Finstein 等，1980）。事实上，高温限制了微生物生长并降低了有机质的降解速率。只有一少部分嗜热细菌可以在超过70° C的温度下继续进行微生物活动。为了得到高降解速率和最大的生物多样性，温度必须处于 30~45° C之间（de Bertoldi 等，1983；Finstein 等，1983；Stentiford，1993）。在堆肥过程中，为了降低保留时间，可以设置一个温度范围为 30~50° C的温度反馈控制装备。

事实上，在堆肥过程中，不能完全排除高温阶段，因为这是减少植物病原体的重要时期。而且，在堆肥化过程的初期，高温阶段会持续一段时间，这时大量存在的易降解分子可以支持温度达到 70° C。

在通气系统中，主要的排热机理是冷却蒸发（水的蒸发），这大约可以移除 80%~90% 的热量。在这种系统中，传导散热的作用可能很小（Finstein 等，1999）



在密闭容器中产生的部分热量可以再利用，通过热泵为家庭和工厂供热（Jaccard 等，1993）。

2.2.2 氢离子浓度 (pH)

通常，有机质可以在很宽的 pH（从3~11）范围内进行堆肥（de Bertoldi 等，1985）最佳的范围是 5.5~8.0。而细菌的最适 pH 是中性，真菌的最适 pH 是酸性。

在实际应用中，堆肥中的 pH 不会轻易改变。通常，因为酸性细菌的作用，使得复杂含碳物质转化为中间产物有机酸，PH 值在初始时会下降（即降到 5.0），当这个酸化过程结束后，中间产物几乎全部消失，pH 就会升高，并且在结束时，PH 为 8.0~8.5。

如果在起始阶段 pH 较高，并且温度较高，就会引起氮元素以氨的形式挥发。在厌氧消化中，临界 PH 在一个很窄的范围内（例如：6.5~7.5），推肥过程中的 pH 范围由很大，很少会遇到因极高或者极低 pH 引起的问题。

因为 pH 不大可能降到抑制微生物的水平，所以不需要在堆肥过程中添加石灰（氢氧化钙）作为缓冲剂。事实上，在堆肥过程中不应该加入石灰，因为石灰会在接下来的阶段导致比正常情况下更多的氮以氨挥发的形式损失。这里有一个例外就是水果的堆肥，在这种垃圾的推肥中，pH 值会降到 4.5。有证据可以证明，在这种情况下，堆肥过程可以加速进行（国家罐头协会研究基金会，1964）。提高温度和 pH 值，相应的堆肥中铵离子会挥发，在堆肥的通气阶段以氨气的形式损失。虽然在大多数有氧堆肥中都会发生氮元素的损失，但是加入石灰后会增加氮元素的损失。但是，可能由于可以作为干燥剂，加入石灰可以改善堆肥废物的物理状态（比如当堆料湿度过大的时候）。

2.2.3 通气

在堆肥中，一个最容易被技术和系统设计方案影响的因素就是堆肥中的氧气供应。堆肥空隙中的空气，随着微生物氧化活动，组成一直在变化。通常，二氧化碳含量上升，而氧气含量下降。堆肥中 CO₂ 和 O₂ 的总含量平均为 20%。氧气含量在 15%~20% 之间变化，二氧化碳含量在 0.5%~5% 之间变化

（MacGregor 等，1981）。如果氧气低于这个浓度，无氧微生物活动将超过有氧微生物活动，就会发生发酵作用和无氧呼吸作用。因此，对系统进行稳定的氧气供应防止微生物的新陈代谢发生变化是十分重要的。经过了几个小时的堆肥，氧气浓度降到非常低的值，并且需要进行通气供氧。每一两天进行周期性的料堆翻转，而不对整体进行任何通气，不能保证堆肥过程中氧气的含量保持在一个恒定的值。

通常，料堆中的氧气都是通过通风得来的（正压或者负压或者两者共同作用）。通风除了可以提供氧气外，也有其他的作用，例如控制温度和水分含量。在 60°C 的堆肥料堆中，控制温度和补充氧气所需的空气量的比例是 9:1（空气作用比）。在较低的温度下，这个比值会相应的增加（Finstein 等，1986，1987，1999；Finstein 和 Hogan，1993）。因此，在需要进行排热作用时通风过程需要通入足够氧气用于有氧呼吸（反过来，有氧呼吸也促进热的产生）。一个较理想的状况是以一个特定的速率进行通风防止无氧过程发生。通常，建议的最佳估算值是每吨湿润基质每分钟通入 0.15m³ 空气。为了控制温度，需要在预定的固定点安置温度反馈控制装备。

许多研究者都致力于研究如何确保堆肥过程中有氧活动所需的空气量。但很多年来研究发明的分析模型都不能用于污水研究，所以达到这个目的是非常难的。



很早之前 Schulze (1960, 1964) 进行了一项研究，在旋转鼓式容器中进行反应时，将空气以给定的速度通入鼓中，并测量出口处的氧气浓度。虽然 Schulze 的研究并没有确定材料所需的氧气量，但是测出了氧气的消耗速率。他发现呼吸比值为 1，具体如下：

产生的二氧化碳/消耗的氧气=1.0

为了确定在一定的环境因素下氧气的摄取值，Schulze 发现，从数量上讲，环境条件越接近最佳值，氧气摄入的速度和数量越大。因为，他得出结论，在 30° 下，每克挥发物需摄入 1mg 氧气，增加到 63° 下，每克挥发物需摄入 5mg 氧气 (Schulze, 1960, 1964; Regan 和 Jeris, 1970; Golueke, 1972)。相反的，如果环境条件恶化，氧气的摄入量会相应降低。这个多变的结果反映了固体堆肥中的生变性，这些也放 Chrometaka (1986) 和 Lossin (1971) 的结论所证明。Chrometzka (1986) 指出，氧气的需要量从成熟堆肥阶段的 $9\text{mm}^3/(\text{g} \cdot \text{h})$ 到新鲜堆肥阶段的 $284\text{mm}^3/(\text{g} \cdot \text{h})$ 。Lossin 提出堆肥的第 1 天需要 $900\text{mg}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 氧气，到堆肥的第 24 天需要 $325\text{mg}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 氧气 (Lossin, 1971)。Regan 和 Jeris (1970) 提出：在 30° C、水分含量为 45% 下，每克挥发固体每小时需要 1.0mg 氧气，到 45° C 水分含量为 56% 时，每克挥发固体每小时需要 13.6mg 氧气。通过之前的研究，我们可以毫无异议地得出如下结论，氧气的摄入量可以反映微生物活动。如果微生物活动很少，就可以判定垃圾进入稳定化阶段。如果这是正确的，那么当堆肥度过高温阶段后，氧气的需求量也会相应地降低。

理论上，氧气的需求量取决于被氧化的碳元素的量。但是，因为废物中的碳元素中，转化为细菌细胞物质和很难被微生物降解的碳元素不能确定，所以不能通过碳含量测定氧气的需求量。由 Schulze (1960) 提出的数值，即每吨挥发物每天消耗 $510 \sim 620\text{m}^3$ 空气，对于装有空气量测量装备的堆肥反应器是很有益的。

从之前的讨论得出的实用性结论就是需要对用于堆肥的不同类型的废物进行试验以确定 通风的速度。对于料堆系统，需要提出适宜的翻转频率；对于静置堆肥和机械反应器，需要指出空气流动速度。

另一个实用性的结论就是，如果不进行积极的处理，不可能保证超过 1t 的堆肥中实现完全的有氧活动。虽然我们的目标是进行大量的通气，但是受到经济方面的限制。由于经济和一定程度的技术方面的共同限制，使得其不会达到完全的有氧活动，实际应用中，氧气的可利用性也就成为一个限制因素。

可以想象，向堆肥系统的输入空气流中添加纯氧会对堆肥化起到极大的促进作用。事实上，这种做法值得提倡。虽然从技术的角度来看这是非常吸引人的，但是花费这么多资金来实现这一做法是否值得仍然存在争议。

2.2.4 水分含量

微生物所有的活动都需要水，并且整个堆肥循环中都需要适当的水。起始材料的最佳水分含量取决于材料的物态、粒子直径以及所使用的堆肥类型。通常，初始材料的水分含量为 60% 是较合理的状态。但是由于不同的材料有不同的含水量，不能精确地概括出关于最佳开始或其它各阶段中的水分含量。

低水分含量意味着对堆肥整体干燥过早，会阻止生物过程并最终得到物理状态稳定但生物状态不稳定的堆肥产物。



水分含量过多会阻塞气孔并阻止气体交换。事实上，我们应该得出可用水的需求量和气体交换之间的恰当平衡。起始阶段水含量过多会偏向无氧过程，导致堆肥化过程速度降低、终产物质量下降。

在现代堆肥系统中，在堆肥化过程中可以加入水。在一个高速产热的系统中，需要通过水的蒸发来排热，这就使材料变得干燥，因此需要周期性地加水来支持微生物的高强度活动，而这需要与机械旋转联合进行。但事实上，水分含量不适合进行连续的甚至频繁的调节，因为水分的加入会影响该过程中多方面的因素。

在堆肥的最后阶段，为了阻止已经稳定的材料中进行进一步的生物活动，水分含量应该相当低（大约30%）。

如前面所说，容许的水分含量和氧气的可利用性密切相关。这种密切相关的基础是堆肥采用的方式。对于所有的堆肥模型，废物基本保持着送到堆肥区域时的状态。在这种情况下，废物中的水分含量和其产生时基本一样。同样的，微生物的氧气供应包括周围空气和垃圾空隙（粒子之间）之间的空气。因为周围空气扩散入堆肥整体的速度很慢，所以空隙之间的空气则是主要的氧气来源。因此，如果堆肥中的水分含量过高，就会取代原有空气的位置，那么堆肥中就会出现无氧条件（厌氧活动）。因此，最大可容许水分含量即空隙之间剩余的空气不能保证足够的氧气供应的含量，换言之，此时氧气变为限制因素。所以，“容许”一词指的是水分含量不会妨碍堆肥过程顺利进行。

最大容许水分含量取决于组成堆肥材料的废物的粒子结构强度，它指的是每个粒子的抗压程度。压缩指的是每个粒子所承受的来自料堆上部的压力。显然，粒子的结构强度越大，可容许的水分含量越高，这种类型的材料包括木屑、稻草、干草、稻壳、玉米皮，这几种材料的混合物的可容许的水分含量高达75%~80%。如果粒子的结构强度很差，它们受到挤压会变形，那么它们的空隙之间的总容积就会相应减少，这就会导致空气和水的可用空间减少，那么可容许的水分含量就会减少（如图）。



纸张是这种材料的典型例子。如果变得湿润，纸张就会瓦解，并形成纸垫。以纸张为主的混合堆肥材料的最高容许水分含量为55%~60%。还有一些堆肥材料的结构强度很小甚至没有。为了方便起见，称这种材料为无定形的，换言之，材料颗粒没有明确的形状，这种材料通常有水果垃圾、罐头垃圾、污泥和没有铺垫材料的动物类便。将这些材料进行堆肥，必须要加入填充剂。填充剂指的是与无定形废物混合后仍可保持其结构完整的试剂，同时填充剂也可以吸收一些水分。任何高结构强度的材料都可以作为填充



剂。如果没有填充剂，需要对无定形材料进行一定的处理使得它们有定的结构强度才可进行堆肥。例如，经过干燥，鸡粪可以成为粒状结构。除非特别的湿润，与新鲜的类便混合时，鸡粪颗粒也可以保持其完整性。在实际应用中，会留出一些完成的堆肥产品作为新的废物的填充剂。有一个很重要的需要记住的问题是如果将干燥的或者堆肥完成的非定型材料作为填充剂，那它和新鲜垃圾的水分含量的总和不得超过 60%。

水分含量的关键作用不应局限于料堆堆肥中，也可以应用于机械堆肥，包括那些频繁搅动堆料的设备。随着堆肥物料中水分含量的增加，材料倾向于变成垫状、块状、球状或者三者混合。巧合的是，在机械堆肥时遇到水分含量问题的点要稍高于料堆堆肥的容许水分含量。

在水分含量的讨论中，使水分含量成为限制因素的最低值也应受到关注。如果水分含量低于 8%~12%，所有的微生物活动都会停止。因此，越接近这个值，水分的限制影响越大。在实际应用中，保持水分含量高于 40% 是较合理的。

2.3 堆肥化过程进程

为了更好地理解堆肥系统中包括的原理和研究适合的监测方案，描述当所有条件都在最优的情况下各个系列事件的发生是十分重要的。描述的开始是材料的放置，即放置为料堆或放置在反应器中。两个明显的可以用于描述堆肥化过程发生顺序的参数就是温度的上升和下降以及外观的连续变化。

2.3.1 温度的上升和下降

通常，温度在堆肥的起始阶段便开始上升，即在材料被堆放成料堆或者装入反应单元后。开始阶段温度是逐渐上升的（停滞期）。在这之后，如果条件合适，温度几乎随时间以指数增加，直至 65~70°C 并达到稳定。根据堆肥系统的类型和垃圾的性质，高温期（平台期）会持续 1~3 星期，随后开始逐渐下降直至达到环境温度。如果条件不够理想，最高温度平台期可能会持续 3 星期以上，但是温度值可能会略微降低，例如在 54~60°C。

温度的上升可以归结于两方面的原因：即微生物活动产热和堆肥料堆的隔离作用减少了热损失。后者表明如果堆肥料堆体积小于临界值，热就会随着产生而迅速损失，料堆就会保持环境温度。如果气候条件可以与加利福尼亚沿岸气候（地中海气候）相似，那么临界体积大约在 1m³。随着温度下降，临界体积就会增加，尤其是在那些经常出现强风天气的地方。

热的产生来源于微生物的呼吸作用。微生物不能完全有效地转换和利用底物中的化学能量，不能被利用的能量变为热能。因为微生物活动量越大，就会释放更多的热，因此，温度的上升可以作为微生物活动的象征。温度的指数上升是由于微生物对废物中易降解成分的作用（例如糖、淀粉和简单蛋白质），在这个阶段，微生物的数量也以指数上升。

如果容易降解的物质被消耗完毕，只剩下难以降解的物质，微生物活动减少，温度也随之下降。可以认为，如果温度降到环境温度或略高于环境温度，大部分不稳定的物质都已经稳定化，此时废物已经堆肥化处理完毕，可以存储和应用。



2.3.2 外观变化

如果堆肥化过程进程顺利，堆肥整体就会脱离原始垃圾的外观而慢慢变成暗黑色。当堆肥化过程结束的时候，整体颜色会呈深灰色。气味的变化也具有很好的连续性。在几天内，新的气味会取代原始材料的气味，新的气味取决于堆肥化过程进行的程度，介于微弱的煮食气味和腐败的肉类气味之间，在堆肥过程中，可能夹杂着刺激性的氨水气味。如果垃圾的 C/N 过低，或者 pH 值超过 7.5，氨水的气味就会遮盖其余的气味。最终，各种气味会消失或者被肥料的气味取代。在结构方面，颗粒尺寸会在降解、磨损和泡软的过程中变小，整体质地变得易碎，同时无定形材料有些许粒状形态。

2.3.3 分子（化学）改变

堆肥过程中另一个不可直观感觉到的改变就是分子结构的改变。通过有机质浓度的下降和稳定程度的上升可以证明这点（有机质常常被称为“挥发物”，因为有机质中的碳元素会被转化为二氧化碳）。因为堆肥过程是一个生物降解过程，所以有机固体中的碳元素被转化为二氧化碳是一个重要环节。因此，部分有机质转化成了二氧化碳。堆肥过程的可控降解特性使得降解过程中复杂的底物变成简单的物质。复杂的分子被生物降解（即可生物降解的）转化成简单分子，而那些部分或者全部不可生物降解的（即顽强的）分子仍然会保持不变。这样下去，材料就会变得稳定化，因为可降解的材料损失或变成简单物质，而不可降解的材料仍保持原状。

堆肥过程可以被分成两部分，称为“堆肥”（“作用”）阶段和“腐熟”（“完熟”、熟化”）阶段。“堆肥阶段”指的是温度急速上升阶段，也可以包括初始的平稳阶段。“腐熟阶段”包括绝大部分高温阶段，延伸并直至温度下降期。这个划分在堆肥发生阶段是完全任意的，换言之，堆肥过程是连续的。

很多商家宣传的在十几天或者一个月内完成堆肥。而对需要至少 30~90 天的腐熟阶段则只是附带地提一下甚至不提。他们所声称的短时间内完成堆肥完全是误导。

2.4 指示物

通过密切观察堆肥化过程，以下四个特征可以作为监视堆肥系统的有效指示，即：

- ①温度的上升和下降；
- ②气味和外观的改变；
- ③质地的改变；
- ④挥发性固体物的降解（即有机质）

如果废物中含有大量惰性材料，四种特征的等级和强度将大大下降。三次污泥就是一个很好的例子。

如果堆肥过程在合适的操作和环境条件下进行，温度在 1~3 或者 4 天内没有快速上升，说明过程出现了严重错误。最可能的原因是水分含量过高或者过低。如果出现恶臭，可能是水分含量过高。如果没有气味，说明材料过于干燥。另外一个原因则是 C/N 过高。但是，如果 C/N 过高，温度也会上升。也有可能是由 pH 在抑制值范围内而引起。加入膨胀材料或者增加通气速度可以用来减少过多的水分，通气可以



使水分蒸发并损失掉。水分不足显然可以通过加入水来解决。通过加入含氮元素较高的废物（如下水道污泥、家禽肉、猪和羊粪）可以改善C/N 比过高的情况。pH过低可以加入石灰，但是要谨记在氢离子浓度的章节提到的建议。

堆肥过程开始后，若前面提到的任何参数出现明显的偏离，则说明系统有问题。例如，如果在温度的指数上升阶段反而出现温度下降说明存在潜在的严重问题。在料堆堆肥中，水分含量过高可以导致温度下降。在机械系统中，通气设备故障也可以导致温度下降。如果由湿度过高引起，加强通气（翻转）是料堆堆肥中最好的补救方法。如果在指数上升阶段或者高温期温度持续渐进地下降说明通气不充分或者湿度不足。

令人不适的气味持续存在则是由湿度过高或者通气不足时的厌氧生物过程引起的。由于这是厌氧生物过程引起的，解决方案就是增加供氧量。因此，嗅觉可以作为监测通气程度的一个优秀手段。在机械系统中，监测出入空气流中氧浓度的设备可以对嗅觉起到补充作用。堆肥料堆中，输出的空气中会含有氧，但这并不能说明通气充分。料堆中适当的空气分布也是通气的必要条件。

如果温度持续下降，而堆肥条件又都合理（即没有限制因素），则说明堆肥化过程进入尾声，堆肥产物开始接近稳定化。通过之前的观察讨论，完全可以认为当温度接近环境温度时，堆肥产物就足够稳定来存储或应用。

2.5 堆肥稳定程度的确定

如之前提到的，我们很难通过直观或者单一参数分析法确定堆肥样品的稳定度和腐熟度。无论是变成黑色，还是具有泥土气味都不能作为指示特征，因为在达到稳定之前就会出现这样的特征。C/N低于20/1也不能作为指示特征。例如，新鲜粪便的C/N很可能低于20/1。干燥度也不能和稳定度混淆。虽然当水分含量低于15%~20%时，微生物活动很少，并且产品有了稳定化的外观特征，但是实际上一旦材料中水分含量上升，材料就会变为脱水之前的稳定度。虽然将稳定化和脱水等同明显是个谬论，但仍然被一些商家当做证据使用。（也就是说，完全干燥的堆肥或者发酵肥可能根本没有腐熟，只是进行了干燥处理）

已经进行的大量测试，很多都因为存在缺陷而大大降低了其实用性。每个测试在实用价值上的缺陷具有普遍性。有机质（挥发物）浓度就是一个例子。通常可以假设所有物质都有相似的有机固体浓度，并且具有相似的生物稳定性。但是这个假设不完全恰当，含有不易降解的有机固体的物质比含有同等浓度的易降解有机固体的物质稳定得多。

早期提出的判定稳定度的方法有：温度的最终下降(Golueke 和 McGauhey, 1953)；自加热能力的程度(Niese, 1963)；材料中容易降解的和不易降解的有机质的数量(Rolle 和 Orsanic, 1964)；氧化还原电位的上升(Moller, 1968)；氧气摄入量(Schulze, 1964)；纤细毛壳真菌的生长(Obrist, 1965)；淀粉测试(Iossin, 1970)

温度最终下降的原理是易降解的（不稳定）材料耗尽时，温度会下降，该方法的优点是应用中的普遍性，但是温度的上升和下降曲线（即温度曲线形状）从本质上讲都忽略了堆肥材料的性质。



Niese 的关于自加热能力的分析是由温度最终下降这一参数演变而来的 (Niese, 1963)。在他的方法中，将需要测试的样品放入包裹着多层棉絮的杜瓦瓶中，并且将杜瓦瓶放入孵化器中进一步减少热量损失，通过温度的上升来指示稳定的程度。该方法也具有温度最终下降法的普遍性。但是他的缺点就是完成的周期很长，可能会需要很多天。

Rolle 和 Orasnic (1964) 的方法是测量有代表性的样品中的可降解材料的量。他们的方法的基本原理是未处理的废物中和测试样品中的可降解材料的浓度之差可以指示出后者的稳定化程度。稳定化和堆肥整体中剩余的可氧化物质所占的比例有关。因此，稳定化程度可以反映出可氧化部分的比例大小。通过测试中使用的氧化剂的量可以测定可氧化部分的量。Rolle 和 Orasnic 的测试包括在重铬酸钾-硫酸溶液中处理样品。反应后，过量的重铬酸钾将有机质全部氧化，反应后剩余的氧化剂的量可以通过硫酸亚铁铵反滴定来确定。可降解有机质的计算公式如下：

$$\text{DOM} = (\text{mL})\text{N} (1 - \text{T}/\text{S}) \times 1.34$$

在上式中，DOM代表干燥物质中可降解有机质的质量分数，mL 是重铬酸钾溶液的毫升数，N 是重铬酸钾的当量浓度，T 是用于反滴定的硫酸亚铁铵溶液的毫升数，S 是硫酸亚铁铵用于空白测试的毫升数。在数值上，不易降解的有机质的量等于燃烧反应中的总重损失和氧化反应中降解的量的差值。

Moller 的测试 (Moller, 1968) 基础是未完成堆肥的材料中会有人类病原体和寄生虫，而在完成的产物中则不再存在。理论上，可降解材料可以使微生物活动聚集化，因此氧气摄入量会上升，最终导致了氧化还原电位的下降。堆肥材料中无机化作用的增加和氧化还原电位的上升同时进行。根据 Moller 的研究，如果料堆核心区域与外部区域的氧化还原电位差在 50mV 以下，说明堆肥已经达到稳定。他没有提供测试机械反应器中材料的方法。在这样的反应器中，不会有区域的概念，使用氧化还原电位的一个重要问题是缺乏精确性和容易受到很多因素干扰。

Obrist (1965) 的研究内容是底物稳定度对纤细毛壳菌类的子实体的生长和产生速度的影响。根据他的研究，菌类的生长依赖于废物整体的化学性质。他的测试是在一个加入了粉碎的堆肥样品的固体培养基中培养纤细毛壳菌，并在 38°C 下培养 12 天。在培养完成后，统计子实体的数量。根据 Obrist 的理论，如果皮物的稳定程度越大，产生的子实体数量就越少。除了测试周期长这个缺点外，还非常需要一个微生物技术非常娴熟的分析员。

根据 Lossin (1970) 的研究，淀粉测试的假设条件是所有废物都含有淀粉，且随着稳定化程度上升，淀粉浓度下降。Lossin 表示废物中有三类碳水化合物：糖类、淀粉和纤维素。毫无异议的是，堆肥过程中最先消失的是糖类，随后是淀粉，最后是纤维素。Lossin 的理由是淀粉比较容易降解，并且所有废物都含有淀粉，如果堆肥进入稳定阶段，则没有淀粉剩余。该分析的原理是在堆肥材料的酸性提取液中会形成淀粉碘化物。这个测试需要格外注意，因为很容易得到错误的结果。这个测试也没有普遍的实用价值。

研究方法由一些比较可靠的测试方法组成 (Wylie, 1957)。这些研究的最初目的之一都是寻找可以快速、容易测定堆肥降解程度的方法，这些方法的“可转移性”和普遍性是需要确定和比较的。研究发现，在这些方法中，自加热、氧气消耗 (4 天) 以及氧气消耗量和化学需氧量比值的方法提供了较可靠的结果。

此后，很多出版物中都提出或者描述其他测试方法。虽然其中很多方法都是近几年开发的，但 Niese 的关于自加热能力的分析仍然被广泛应用着。



合格的堆肥

堆肥作为土壤改良剂使用，可大大提高土壤肥力、质地、通气性、养分含量以及保持水土的能力，且长期使用有抑制土壤病菌的作用。

堆肥产品的一些常规物理性质包括颜色、颗粒大小、泥土气息、有无污染物、水分、养分和有机质含量。

颜色

堆肥腐熟好的产物一般颜色会自然变暗，通常不论几种底物发酵，最后的产物都应该是暗黑色、深褐色或者棕色（接近泥土的颜色）。

颗粒大小

腐熟好的堆肥颗粒一般1到几毫米不等，主要取决于堆肥过程中湿度控制和翻堆方式，比如湿度大就容易形成球粒，但在腐熟好的堆肥中，颗粒都是可以轻松碾碎的，至少在有湿度时是的。腐熟好的堆肥基本上是不均匀的小团粒状，不大会出现大块的物质，更不会有不规则形状的泥块等。

气味

气味是一种相对简单但很实用的监测堆肥进程的方法。在堆肥过程中难闻气味的出现通常说明了厌氧反应的出现，这是不利于堆肥进行的。而连续出现强烈的泥土气息是一种好的现象（但也不绝对），表明堆肥过程接近或已经完成。在挑选堆肥的过程中，土壤有机改良剂的专业使用者一般会寻找有强烈泥土气息的堆肥（尤其在堆肥发酵好1个月时间内）。

污染物

合格的堆肥产物不应该含有明显的污染物，例如：动物毛发、生秸秆纤维、泥块、石块、玻璃颗粒、金属及塑料制品等。另外，堆肥不能含有高浓度的杂草种子、重金属、有毒物质以及病原体。

水分含量

大多数情况下，制成的堆肥的水分含量必需低于50%，以方便处理、运输及应用。正常的堆肥产品结束腐熟后，湿度应该在30%~50%之间。通俗的辨别方法是，用手攥起一把堆肥，微微湿但是不黏，攥紧后一捻就松散的状态。

养分含量

堆肥中的养分是可以被植物利用的，一些非常重要的植物养分包括氮、磷、钾，微量元素包括铜、锰、铁、镁等。然而堆肥中养分含量并不是唯一决定堆肥产品质量的指标。

有机物质

堆肥的真正利用价值是用它来提高土壤中的腐殖质含量。腐殖质能提高土壤的松软程度以及涵养水分的能力。

堆肥的质量除了控制好温度、湿度、供氧等因素外，原料的选择也十分重要，一般单一原料源的有机原料制成的堆肥要比混合原料制成的堆肥具有更高的质量以及更好的耐久性，这主要是由于前者具有更少的污染物聚集性。

除了上面这些因素，判断堆肥品质的因素还包括盐度、稳定性/成熟度、原材料、pH值、碳氮比、主体密度等。

可用于评价堆肥质量的特征：

物理特征：

- 主体密度
- 颜色
- 水分含量
- 气味
- 有机物含量
- PH值
- 粒径分布
- 保水能力
- 污染物（惰性物质）
- 成熟度

化学特征：

- 营养物质（宏观和微观）
- 重金属
- 可溶性盐类

有机生物：

- 有毒化合物
- 病原体
- 种子萌发
- 杂草种子

研究表明，土壤中持续使用堆肥对达到适宜PH值、提高农作物产量、增加有机物含量、增加阳离子交换能力、提高植物养分供给、增加保水能力都有很好的效果。

使用堆肥的另一个好处是，堆肥中有机质的存在使土壤中无机营养元素（例如氮、磷、钾）的溶解性降低。高溶解性无机营养物质向缓慢溶解性有机物的转变可以增加植物对营养物质的吸收率。堆肥和化肥的竞争开始逐渐减弱，而且这两种物质现在被更多的认为具有互补性。这种认识上的转变是由于我们认识到了如下事实的重要性：

1. 土壤中有有机物的存在提高了植物对化肥的利用效率；
2. 堆肥可以充当土壤中氮、磷、钾来源的补充而不是竞争者；
3. 堆肥提高了土壤中有有机物质的浓度，因此增加了土壤的保水能力；
4. 非有机物肥料的价格在上涨；



名词表

(1) 堆肥：堆肥是被分解和回收的有机物质作为肥料和土壤调理剂。堆肥是有机农业的关键成分。

在最简单的层面上，堆肥过程需要将一批被称为绿色废物（叶子，食物废物）的湿的有机物质物料在等待数周或数月后分解成腐殖质。现代的，有条不紊的堆肥是一个多步骤，密切监测的过程，具有测量水，空气和碳氮富含材料的输入。分解过程通过切碎植物物质，加水并通过定期转动混合物确保适当的通气来辅助。蠕虫和真菌进一步分解材料。需要氧气工作的细菌（好氧细菌）和真菌通过控制化学过程，将输入转化为热，二氧化碳和铵。铵（ NH_4^+ ）是植物使用的氮的形式。当植物不使用铵，可用的铵被细菌进一步通过硝化作用转化为硝酸盐（ NO_3^- ）。

堆肥富含营养。它广泛用于花园，园林绿化，园艺和农业。堆肥本身在许多方面对土地有利，包括作为土壤调理剂，肥料，添加重要腐殖质或腐植酸，以及作为土壤的天然杀虫剂。在生态系统中，堆肥可用于侵蚀控制，土地和溪流复垦，湿地建设以及堆填区。

堆肥正常进行的基础条件：碳、氮、氧、水

堆肥生物需要四个同样重要的成分才能有效地工作：

- 碳 - 能量；碳的微生物氧化产生热量，如果包括在建议的水平。（高碳材料往往是棕色和干燥的。）
- 氮 - 生长和繁殖更多的生物体以氧化碳。（高氮材料往往是绿色的（或多彩的，如水果和蔬菜）和湿的。）
- 氧 - 用于氧化碳，分解过程。
- 水 - 正确地维持活动而不引起厌氧条件。

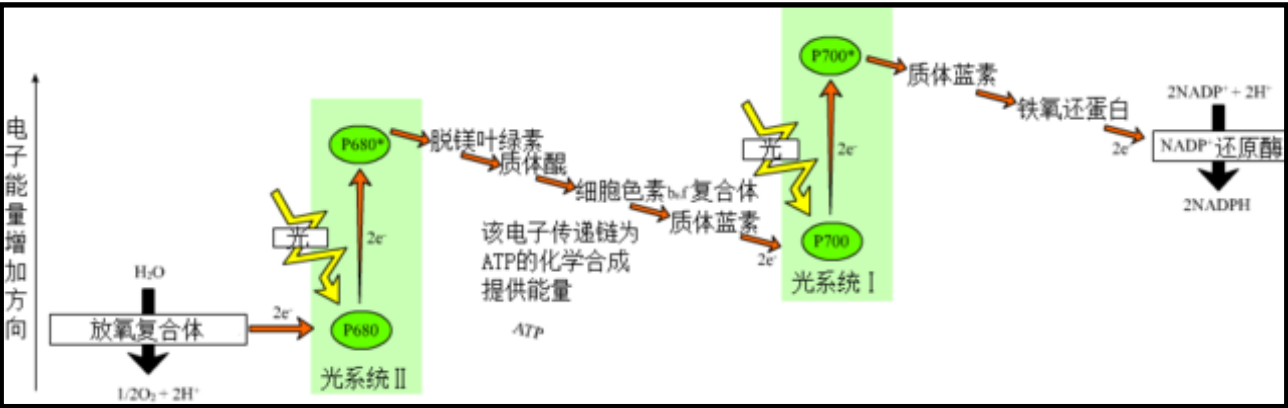
(2) 发酵：发酵作用（英语：fermentation）有时也写作酸酵，其定义由使用场合的不同而不同。通常所说的发酵，多是指生物体对于有机物的某种分解过程。发酵是人类较早接触的一种生物化学反应，如今在食品工业、生物和化学工业中均有广泛应用。其也是生物工程的基本过程，即发酵工程。

(3) 腐殖质：腐殖质（humus），又作腐植质，是土壤特有有机质，也是土壤有机质的主要组成部分，约占有机质总量的50%－65%。腐殖土则是富含腐殖质的土壤。

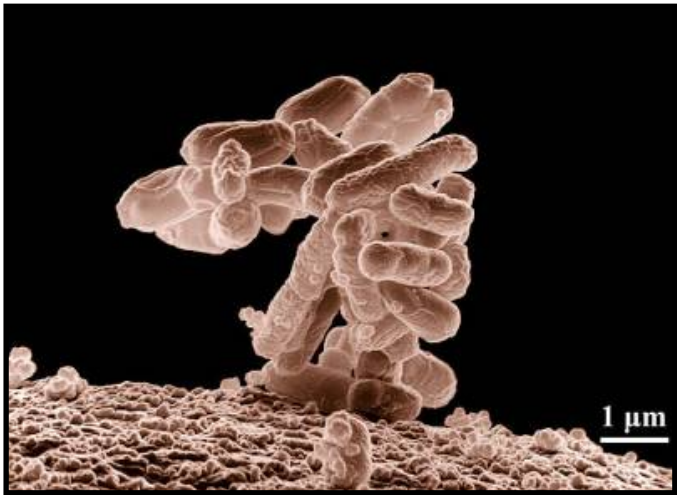
腐殖质是一种分子复杂、抗分解性强的棕色或暗棕色无定形胶体，动植物残体（如：植物枯枝落叶及动物的排泄物、皮毛和尸体）经微生物分解转化又重新合成的一类有机高分子化合物。整体黑色或褐色，无定型。具有适度的粘结性，能够使粘土疏松，粘土粘结，是形成团粒结构的良好胶结剂。腐殖质的成分主要有胡敏酸（humic acid，腐植酸）、富里酸（fulvic acid）、胡敏素（humine）等，其含量比例随土壤而异。

在养分生物循环中，生物死亡后，生物残体会进行矿物化的过程转化成矿质养分。但是生物残体也会不完全被矿物化。生物残体会进行腐殖化过程，以腐殖质形式保留下来。即是在养分生物循环中，生物残体转化成矿质养分的一个养分储藏室，腐殖质最终会进行矿物化过程转化成矿质养分的。腐殖质的重要是当雨水冲走泥土上的矿质养分时，而微生物未能及时分解生物残体来补充（微生物分解生物残体时间很慢），腐殖质可以根据土壤养分浓度来释出养分来补充，对肥力有积极作用。

（4）光合作用：光合作用是植物、藻类等生产者和某些细菌，利用光能把二氧化碳CO₂、水或硫化氢变成碳水化合物的过程。可分为产氧光合作用和不产氧光合作用。光合作用会因为不同环境，改变反应速率。



（5）微生物：微生物是难以用肉眼直接看到的微小生物总称，包括细菌、真菌、放线菌、原生动物、藻类等具有细胞结构的微生物，以及病毒、支原体、衣原体等无完整细胞结构的生物。微生物一般需要借助显微镜来观察研究。（下图为：一群放大10000倍的大肠杆菌细菌。）



（6）木质素：木质素（拉丁语、英语、德语: Lignin）是一类复杂的有机聚合物，其在维管植物和一些藻类的支持组织中形成重要的结构材料。木质素在细胞壁的形成中是特别重要的，特别是在木材和树皮中，因为它们赋予刚性并且不容易腐烂，具疏水性。在化学上，木质素是交叉链接的酚聚合物，属于一种芳香族高聚物。维管或木本植物的木质部含有大量木质素，使木质部维持极高的硬度以承托整株植物的重量。木质素呈褐色粉末，木材的颜色即是木质素造成的。

(7) 纤维素：纤维素 (cellulose) 是一类有机化合物，其化学通式为 $(C_6H_{10}O_5)_n$ ，是由几百至几千个 $\beta(1\rightarrow4)$ 连接的D-葡萄糖单元的线性链（糖苷键）组成的多糖。纤维素是绿色植物的、许多形式的藻类和卵菌的原代细胞壁的重要结构组分；一些种类的细菌分泌它以形成生物膜。纤维素是地球上最丰富的有机聚合物，是自然界中分布最广、含量最多的一种多糖，是组成植物细胞壁的主要成分。棉花、亚麻、苧麻和黄麻部含有大量优质的纤维素。棉花纤维中的纤维素含量是90%，木头中纤维素含量是40%-50%，干燥的麻中纤维素含量是57%。天然纤维素为无味的白色丝状物。纤维素不溶于水、稀酸、稀碱和有机溶剂，但在加热的条件下会被酸水解，主要的生物学功能是构成植物的支持组织。

(8) 放线菌：放线菌 (Actinobacteria) 是一类革兰氏阳性细菌，可栖息于水中或陆地上，虽然一开始被认定为土壤菌，但淡水中的种类可能比陆地上的更丰富，它们具有分支的纤维和孢子，依靠孢子繁殖，表面上和属于真核生物的真菌类似。曾经由于放线菌的形态，人们认为它们是介于细菌和霉菌之间的物种，因此原来它们被分类为“放线菌目” (Actinomycetes)。但因为放线菌没有核膜，且细胞壁由肽聚糖组成，和其它细菌一样。目前透过分子生物学方法，放线菌被确定为细菌的一个大分支。放线菌用革兰氏染色可染成紫色（阳性），和另一类革兰氏阳性菌——厚壁菌门相比，放线菌的GC含量较高。但2012年的研究显示，一些淡水的放线菌的GC含量较低，这些淡水放线菌的GC比可以低至 42%。

放线菌大部分是腐生菌，普遍分布于土壤中，一般都是好气性，有少数是和某些植物共生的，也有是寄生菌，可致病，寄生菌一般是厌气菌。放线菌有一种土霉味，使水和食物变味，有的放线菌也能和霉菌一样使棉毛制品或纸张霉变。放线菌在培养基中形成的菌落比较牢固，长出孢子后，菌落有各种颜色的粉状外表，和细菌的菌落不同，但不能扩散性的向外生长，和霉菌的也不同。放线菌有菌丝，菌丝直径有 1μ ，和细菌的宽度相似，但菌丝内没有横隔，和霉菌又不同。放线菌主要能促使土壤中的动物和植物遗骸腐烂，最主要的致病放线菌是结核分枝杆菌和麻风分枝杆菌，可导致人类的结核病和麻风病。放线菌最重要的作用是可以产生、提炼抗生素，目前世界上已经发现的2000多种抗生素中，大约有56%是由放线菌（主要是链霉菌属）产生的，如链霉素、土霉素、四环素、庆大霉素等都是由放线菌产生的。此外有些植物用的农用抗生素和维生素等也是由放线菌中提炼的。